

اثر سرعت جریان هوا بر سینتیک سرد شدن لایه‌های مختلف انار در پیش‌خنک‌کاری با هوای سرد اجباری

محمدعلی به‌آئین^{۱*}، اصغر محمودی^۲، سیدفرامرز رنجبر^۳، عنایت‌الله نقوی^۴

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

۴- دانشجوی دکتری گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت: ۹۴/۰۶/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۱۶)

چکیده

هدف از مطالعه حاضر، تعیین اثر سرعت‌های جریان هوا بر فرایند پیش‌خنک‌کاری انار پوست نازک (رقم شهوار)، ارزیابی آهنگ سرد شدن و توزیع دما در این محصول به منظور طراحی و بهینه‌سازی سیستم پیش‌خنک‌کاری بود. برای عملیات پیش‌خنک‌کاری در مرکز (دانه انار) و پوست انار، از هوای سرد اجباری استفاده گردید. در طول انجام آزمایش، از سطوح سرعت جریان هوای سرد ۰/۵، ۱ و ۱/۳ متر بر ثانیه و دمای هوای ۷/۲ درجه سانتی‌گراد در تونل هوا استفاده شد. برای محاسبه آهنگ سرد شدن (زمان نیم و هفت-هشتم سرد شدن)، فاکتور تأخیر و ضریب سرد شدن با استفاده از داده‌های آزمایشی و به وسیله برازش رگرسیون تعیین شدند. همچنین، غیریکنواختی سرد شدن در مرکز و لایه بیرونی انار در سرعت‌های مختلف جریان هوای سرد ارزیابی شد. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت جریان هوا از ۰/۵ به ۱/۳ متر بر ثانیه، آهنگ سرد شدن افزایش یافت. علاوه بر این، با افزایش سرعت جریان هوا، زمان نیم و هفت-هشتم سرد شدن به ترتیب ۱۹/۳۵ و ۲۱/۷۶ درصد در مرکز و ۳۲/۹۵ و ۱۹/۶۳ درصد در پوست کاهش یافت. این نتیجه به دلیل افزایش در ضریب انتقال حرارت همرفتی بود. غیریکنواختی سرد شدن از سرعت ۰/۵ تا ۱ متر بر ثانیه کاهش و از سرعت ۱ به ۱/۳ متر بر ثانیه افزایش یافت. این پارامتر به متغیرهایی مثل سرعت جریان هوا، ضریب سرد شدن و فاکتور تأخیر وابسته بود. بعد از ۶۴۰۰ ثانیه از ابتدای سرد شدن، اثر سرعت جریان هوا روی فرایند خنک‌کاری در مرکز و پوست میوه کم بود. نتایج کلی نشان داد که استفاده از این روش می‌تواند انتقال حرارت ناپایا را در پیش‌خنک‌کاری انار توضیح دهد و احتمالاً می‌تواند برای سایر محصولات کروی شکل نیز مورد استفاده قرار گیرد.

کلید واژگان: انار، خنک‌کاری با هوای سرد اجباری، آهنگ سرد شدن، پیش‌خنک‌کاری، توزیع دما

*مسئول مکاتبات: ali_behaen@yahoo.com

۱- مقدمه

انار با نام علمی *Punica granatum*^۱ یکی از میوه‌های مهم مناطق نیمه‌گرمسیری است. این میوه غنی از ترکیبات زیست‌فعال مانند اسیدهای فنولی، تانین‌ها، فلاونول‌ها و آنتوسیانین‌ها^۲ می‌باشد که مصرف آن را به دلیل ثابت شدن نقش آن در بهبود سلامتی انسان از طریق کاهش خطر ابتلا به تصلب شرایین^۳، سرطان و دیابت افزایش داده است [۱]. ایران بزرگترین تولیدکننده انار در جهان است [۲]. انار ایران به دلیل کیفیت مرغوب از نظر صادرات به خارج از کشور دارای اهمیت اقتصادی فراوان است. با توجه به سطح زیر کشت بالای انار در کشور، مسئله نگهداری و کنترل عوامل مؤثر بر کاهش کیفیت این میوه پس از برداشت، از اهمیت زیادی برخوردار است.

کیفیت، مهم‌ترین فاکتور در پذیرش محصول توسط مصرف‌کننده است. ویژگی‌های کیفی محصول، اندازه، شکل، رنگ، بافت، طعم و عطر می‌باشند. از بین عواملی که در تعیین کیفیت و عمر نگهداری میوه‌ها دخالت دارند، دما مهم‌ترین عامل است که باعث تغییر در تنفس، تعادل قند-نشاسته و تغییر در رسیدگی محصول می‌شود که هر کدام از این عوامل از نظر فیزیولوژیکی و شیمیایی روی کیفیت‌های ذکر شده، اثرگذار می‌باشند [۳]. از آن‌جا که دما دارای اثر قابل توجه بر فساد محصولات است، مدیریت دما یک اصل مهم در نگهداری و حفظ کیفیت محصولات باغبانی پس از برداشت می‌باشد [۴]. دمای مزرعه می‌تواند به بیش از ۳۰ درجه سانتی‌گراد برسد. بنابراین، تأخیر در سرد کردن محصول کاهش کیفیت را به دنبال دارد [۵]. بنا بر گزارش‌ها، ضایعات پس از برداشت میوه‌ها و سبزی‌های تازه بر اساس نوع محصول از ۵ تا ۵۰ درصد متغیر است [۶]. یکی از روش‌های رفع سریع گرمای مزرعه، پیش‌خنک‌کاری محصولات کشاورزی است [۷] که آهنگ پیری محصولات را کاهش داده و بنابراین، منجر به افزایش مدت ماندگاری محصول و به تعویق افتادن فساد آن می‌گردد [۸]. روش‌های مختلفی در پیش‌خنک‌کاری محصولات در کاربردهای تجاری وجود دارد. این روش‌ها عبارتند از: ۱) خنک‌کاری با هوای تحت فشار، ۲) خنک‌کاری در اتاق، ۳) خنک‌کاری تحت

خلأ، ۴) خنک‌کاری با آب، ۵) خنک‌کاری با یخ و ۶) خنک‌کاری با تبخیر. انتخاب هر یک از این روش‌ها بستگی به آهنگ سرد شدن مورد نظر، حساسیت محصول به آب یا یخ، تجهیزات قابل دسترس و طبیعت محصول از نظر ارزش دارد [۹]. به منظور کاهش تنفس، افزایش عمر انبارداری و افزایش کیفیت، انجام پیش‌خنک‌کاری در مورد انار ضروری است. متداول‌ترین نوع پیش‌خنک‌کاری در مورد محصولات نیمه‌گرمسیری مانند انار، استفاده از هوای سرد اجباری است [۱۰]. مزایای پیش‌خنک‌کاری با هوای سرد اجباری شامل استفاده آسان، کاهش سریع دما و خشک بودن سطح محصول خنک شده (برخلاف خنک‌کاری با آب) است. لازم به ذکر است که کاهش آهسته دما باعث تغییر بافت، رنگ و وزن محصول می‌شود [۱۱]. محدودیت‌های استفاده از این روش، کاهش وزن محصول و طراحی نامناسب سیستم خنک‌کننده می‌باشد که می‌تواند عدم کارایی و هزینه‌های استفاده از این روش را افزایش دهد [۱۲]. ترکیب عوامل معینی مانند سطح و موقعیت روزنه‌های جعبه و آهنگ جریان هوا می‌تواند تا نقطه معینی کارایی فرایند را در سرد شدن با هوای سرد اجباری افزایش دهد [۱۳]. نکته دیگری که باید توجه داشت این است که کاهش در مدت ماندگاری محصول، ناشی از سرد شدن کند و غیریکنواخت است [۱۴]. محصولات مختلف و حتی محصولات یکسان با وارته‌های مختلف، اختلافات قابل توجهی از نظر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی دارند [۱۵]. بنابراین، مقایسه وارته‌های مختلف از نظر ویژگی‌های سرد شدن لازم است. در سرد کردن با هوای سرد اجباری، گرما به وسیله مکانیسم همرفت (انتقال حرارت ناپایا) بین سیال سرد کننده و جسم جامد انتقال می‌یابد [۱۲-۱۵]. سرعت خنک‌کاری با هوای تحت فشار ۱۰-۴ برابر بیشتر از خنک‌کاری در اتاق و نصف خنک‌کاری با آب است.

عوامل زیادی روی پیش‌خنک‌کاری محصولات تأثیر دارند. در این ارتباط، سرعت هوای سرد یکی از فاکتورهای مؤثر در سرد کردن میوه‌ها و سبزی‌ها است [۱۶]. همچنین، نشان داده شده است که آهنگ سرد شدن در یک سیستم خنک‌کاری با هوای سرد تحت فشار، در درجه اول به سرعت هوای سردی که به محصول برخورد می‌کند، بستگی دارد و این تنها پارامتر قابل کنترل در بین سایر متغیرها است؛ زیرا عواملی مثل اندازه، شکل و خصوصیات

1. *Punica granatum* L.
2. Phenolic acids, tannins, flavonols and anthocyanins
3. Atherosclerosis

هفت- هشتم سرد شدن تا ۲۳/۶٪ کاهش یافت. هنگام سرد - کردن محصولات کشاورزی که بسته‌بندی شده و شکل‌های منظم و یکنواختی ندارند، سرعت و دیگر پارامترهایی که با اندازه و شکل محصول در ارتباط هستند به طور واضح نمی‌توانند به وسیله فرمول‌های عمومی بیان شوند؛ اما روابط تجربی بین سرعت هوا و میزان سرد شدن می‌توانند برای اکثر محصولات کشاورزی در بسته‌ها و الگوهای مختلف انبارکردن تشخیص داده شوند [۱۸]. تعیین پروفایل‌های زمان-دما، گام مهمی در فرایند خنک‌کاری محصولات کشاورزی است. همچنین، آهنگ انتقال حرارت می‌تواند به طور مستقیم از تغییرات منحنی‌های زمان-دما به دست آید [۲۰]. این منحنی‌ها به منظور طراحی دستگاه‌های خنک‌کننده، بهینه نمودن عملکرد، تعیین شرایط مناسب برای قرار دادن محصول در سردخانه و پیش‌بینی پایداری و کیفیت محصول نهایی کاربرد دارد [۲۲].

در مطالعات قبلی گزارش شده است که با افزایش آهنگ جریان هوا، زمان سرد شدن در توت فرنگی با یک رابطه غیرخطی کاهش یافت [۲۳]. بررسی انتقال حرارت روی یک انار تکی نتایج دقیق‌تری را در مورد رفتار میوه در زمان سرد شدن ارائه می‌دهد. فرایند پیش‌خنک‌کاری محصولات همانند سایر فرایندهای فرآوری پس از برداشت، انرژی زیادی مصرف می‌کند. بنابراین، اگر بتوان زمان سرد کردن محصولات را کاهش و نقطه بهینه اثرگذاری فرایند سرد کردن (نقطه‌ای که بعد از آن، سرد کردن بیشتر محصول اثر چندانی ندارد) را تعیین نمود، می‌توان به کاهش مصرف انرژی کمک کرد. در سال‌های اخیر، نتایج پژوهش‌ها روی توزیع دما و خصوصیات گرمایی محصولات از جمله میوه‌ها و سبزی‌ها متمرکز شده و به متغیرهای مؤثر در فرایند سرد شدن و ارائه روشی که به آسانی این فرایند را مورد بررسی قرار دهد، توجه نشده است. همچنین، تاکنون پژوهشی در ارتباط با انتقال حرارت ناپایا در انار صورت نگرفته است. بنابراین، هدف از این مطالعه تجزیه و تحلیل تأثیر سرعت‌های مختلف هوای سرد روی آهنگ سرد شدن و توزیع دما در یک نوع انار با پوست نازک به نام شهوار بود. نتایج پژوهش حاضر می‌تواند به عنوان یک راهنما در طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های پیش‌خنک‌کاری محصولات به منظور افزایش کارایی فرایند مورد استفاده قرار گیرد.

فیزیکی محصول غیرقابل تغییر هستند [۱۷ و ۱۸]. دمای هوای سرد نیز یک عامل محدودکننده بوده و به دلیل ایجاد یخ‌زدگی نمی‌تواند به پایین‌تر از یک نقطه معین کاهش یابد.

در یک مطالعه گزارش شد که افزایش سرعت هوا از ۰/۲ به ۳/۶۵ متر بر ثانیه، زمان خنک شدن محصول را ۳ تا ۶ برابر (بر حسب نوع بسته‌بندی) کاهش می‌دهد [۱۹]. در همین راستا، در پژوهشی دیگر گزارش شد که با افزایش جریان هوا از ۰/۰۰۲ به ۰/۰۰۴ متر بر ثانیه، به ازای هر کیلوگرم محصول، زمان هفت-هشتم سرد شدن ۴۰-۳۰٪ کاهش پیدا کرد [۹]. سرد شدن سریع محصول یکی از مزایای استفاده از سرد کردن با هوای سرد اجباری است که می‌تواند با تغییر سرعت هوای سرد، آهنگ سرد شدن را افزایش دهد. در آزمایش‌هایی که روی سرد شدن پرتقال و گوجه‌فرنگی انجام شد، پی برده شد که با افزایش سرعت هوای سرد، مقدار ضریب سرد شدن (C) افزایش یافت؛ اما پارامتر فاکتور تأخیر (J) در دامنه ۱/۱۴-۱/۰۹ برای پرتقال و ۱/۱۱-۱/۰۸ برای گوجه‌فرنگی تقریباً ثابت باقی ماند [۲۰]. همچنین، زمانی که سرعت هوا از ۱/۲ به ۴/۴ متر بر ثانیه افزایش پیدا کرد، ضریب سرد شدن تا ۳۸٪ برای پرتقال و ۷۸٪ برای گوجه‌فرنگی تغییر نمود. علاوه بر این، نتایج در مورد انتقال حرارت پرتقال و گوجه‌فرنگی در دمای ۵-۴ درجه سانتی‌گراد و محدوده سرعت ۴/۴-۱/۲ متر بر ثانیه نشان داد که سرعت هوا تأثیر معنی‌داری بر آهنگ سرد شدن محصول در دمای بی‌بعد ۰/۶ دارد. سرعت هوا برای سرد شدن پرتقال ۳/۵ متر بر ثانیه و در مورد گوجه‌فرنگی ۲/۶ متر بر ثانیه به دست آمد. افزایش در سرعت هوای سرد بالاتر از مقادیر فوق، تأثیر معنی‌داری روی آهنگ سرد شدن نداشت.

در یک پژوهش پیش‌خنک‌کاری یک لایه انگور، وارپته سولتانان مورد بررسی قرار گرفت [۲۱]. دمای هوا ۴ درجه سانتی‌گراد و سرعت جریان هوا ۱ و ۲ متر بر ثانیه بود. متغیرهای سرد شدن از قبیل فاکتور تأخیر، ضریب سرد شدن، زمان نیم و هفت-هشتم سرد شدن اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان داد که متغیرهای ذکر شده به سرعت جریان هوا وابسته هستند و با افزایش سرعت هوا از ۱ به ۲ متر بر ثانیه، زمان نیمه سرد شدن تا ۲۱/۸٪ و زمان

تونل به وسیله یک ترموستات دیجیتال ۷/۲ درجه سانتی گراد تنظیم گردید.

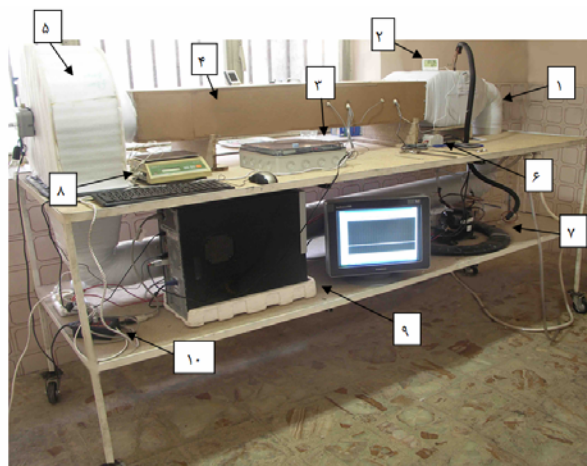


Fig 1 Experimental set up of the forced air cooling
1. Air circulating pipe, 2. Relative humidity indicator,
3. Sensors interface, 4. Air tunnel, 5. Backward
centrifugal fan, 6. Thermostat, 7. Cooling system,
8. Weight indicator, 9. Microprocessor unit,
10. Controllable air velocity equipment

۲-۴- فرضیات

برای انجام آزمایشات فرضیات زیر در نظر گرفته شد:

- ۱- نمونه‌های آزمایش همگن و ایزوتروپ هستند. ۲- شرایط آزمایش در حالت انتقال حرارت ناپایا انجام می‌شود. ۳- دما و رطوبت محصول در لایه‌های مختلف یکنواخت هستند. ۴- خصوصیات ترموفیزیکی و دمای هوا در تونل ثابت هستند. ۵- در زمان انجام آزمایش، ضریب هدایت حرارتی، نفوذ گرمایی و ظرفیت گرمایی ویژه محصول ثابت می‌باشند (990 kg/m^3).
- ۶- از $k_p = 0.51 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ و $C_{p,p} = 3538/65 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$. ۷- گرمای حاصل از تنفس به دلیل سرد شدن سریع محصول صرف- نظر می‌شود. ۷- مقادیر ضرایب انتقال حرارت همرفتی برای شرایط انجام این آزمایش کاربرد دارند.

۲-۵- اندازه‌گیری پارامترها

با در نظر گرفتن فرضیات بیان شده در مورد دمای محصول، دمای هوا و شرایط ناپایا، دمای بی‌بُعد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\theta = \frac{T - T_a}{T_i - T_a}$$

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

رقم انار مورد استفاده شهوار (پوست نازک) بود که از شهرستان ارسنجان واقع در استان فارس تهیه گردید. مطالعه آهنگ سرد شدن در مرکز و پوست انار انجام شد. همچنین، رطوبت نمونه-های مورد نظر بر اساس وزن مرطوب به مدت ۲۴ ساعت در آن با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تعیین گردید. رطوبت در مرکز و پوست انار به طور متوسط به ترتیب ۸۴/۱۵ و ۶۸/۳۸٪ بود.

۲-۲- تجهیزات

پیش‌خنک‌کاری با هوای سرد اجباری با استفاده از یک دستگاه طراحی شده در گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه تبریز شامل فن سانتریفوژ بک‌وارد، تونل هوا (محل قرارگیری نمونه انار) و سیستم خنک‌کاری انجام شد. به منظور استفاده بهینه از انرژی، یک لوله پلی‌اتیلن به قطر ۰/۱۵ متر جهت گردش هوا استفاده شد. جزئیات دستگاه مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۳- روش کار

در هر آزمایش، شش سنسور 100 pt به طول ۰/۰۰۳ متر، عرض ۰/۰۰۲ متر و ارتفاع ۰/۰۰۱ متر در یک انار تکی استفاده گردید. دو سنسور در مرکز و دو سنسور نیز در پوست انار قرار داده شد. همچنین، دو سنسور در ابتدا و انتهای تونل هوا (قبل و بعد از نمونه)، دمای ورود و خروج هوا را ثبت نمودند. محل قرارگیری سنسور در درون نمونه‌های انار عایق‌بندی گردید. سنسورهای مورد استفاده دما را در هر ثانیه در نرم‌افزار LabView 2010 ثبت نمودند. دقت هر سنسور ± 0.1 درجه سانتی‌گراد بود. قبل از انجام آزمایش، نمونه‌ها در یک محیط همگن قرار داده شد (۲۵ درجه سانتی‌گراد) تا نمونه‌ها از نظر دمایی تقریباً یکسان گردند. نمونه‌های مورد نظر روی یک پایه در درون تونل قرار داده شدند و سپس، دستگاه عملیات خنک‌کاری را انجام داد. سرد شدن نمونه انار تا رسیدن دمای مرکز انار به ۱۰ درجه سانتی‌گراد ادامه یافت. سرعت هوا با استفاده از یک آنومتر سیم داغ (Lutron-YK, 80AM, Taiwan) و یک وسیله کنترل تغییر سرعت اندازه‌گیری و سپس، سرعت‌های ۰/۵ و ۱/۳ متر بر ثانیه برای انجام آزمایش‌ها انتخاب گردید. دمای هوای درون

$$S_d / \bar{T} = \text{غیریکنواختی سرد شدن}$$

که در آن S_d ، انحراف استاندارد دماهای لحظه‌ای (C°) و \bar{T} ، متوسط دمای لحظه‌ای (C°) می‌باشد.

سرعت‌های مختلف هوای سرد می‌تواند روی این پارامتر تأثیر قابل توجهی داشته باشد [۲۶].

۲-۷- افت وزن میوه

یکی از محدودیت‌های استفاده از پیش‌خنک‌کاری با هوای سرد اجباری، احتمال از دست دادن آب محصول است. به منظور ارزیابی کاهش وزن محصول در اثر از دست دادن آب، این پارامتر بر اساس معادله زیر در سرعت‌های مختلف هوای سرد در انارهای تکی به وسیله ترازوی دیجیتال با دقت ± 0.01 مورد بررسی قرار گرفت. درصد کاهش وزن از نسبت تفاضل وزن اولیه (W_i) و ثانویه (W_f) به وزن اولیه به دست آمد.

$$\text{کاهش وزن (\%)} = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آهنگ سرد شدن و محاسبه پارامترهای

فرایند در سرعت‌های مختلف

پس از ثبت دماهای مرکز و پوست انار به وسیله سنسورها، بی‌بعد کردن دما انجام و سپس با استفاده از رگرسیون نمایی، داده‌های دمای بی‌بعد و زمان رسم و از معادله برازش منحنی، ضرایب تأخیر و سرد شدن به دست آمدند. در مرحله بعد، با استفاده از معادلات ۴ و ۵، زمان‌های نیم و هفت-هشتم سرد شدن به دست آمد (جدول ۱). نمودارهای داده‌های آزمایشی و برازش شده سرد شدن برای مرکز و پوست میوه، تقریباً بر هم منطبق بوده و حداکثر اختلاف بین آن‌ها ۵/۵۷ درصد است. ضریب تأخیر بیشتر از ۱ نشان‌دهنده یک مقاومت داخلی به انتقال حرارت در برابر جریان هوا می‌باشد.

همچنین دمای بی‌بعد بر اساس معادله نمایی زیر شامل پارامترهای ضریب سرد شدن و فاکتور تأخیر محاسبه می‌شود [۷].

$$\theta = J \exp(-Ct)$$

ضریب سرد شدن (C) ، شیب منحنی سرد شدن می‌باشد و شاخصی از توانایی سرمایه‌گذاری یک محصول است. فاکتور تأخیر (J) ، تابعی از اندازه، شکل و خصوصیات حرارتی محصول مثل ضریب انتقال حرارت، ضریب هدایت گرمایی و انتشار گرما است و مقاومت داخلی در برابر انتقال حرارت محصول به محیط اطراف را بیان می‌کند. علاوه بر این، ضریب سرد شدن، از نسبت تغییر دمای فرآورده در واحد زمان در هر لحظه (R) به اختلاف دمای بین فرآورده و ماده خنک‌کننده (dT) به دست آمده و مقدار آن منفی است [۲۰].

$$C = R / dT$$

این دو پارامتر به وسیله برازش داده‌های دمای بی‌بعد و زمان به دست می‌آید. مقدار فاکتور تأخیر، بین ۱ و ۲ در وسط نمونه خنک شونده می‌باشد. آهنگ سرد شدن با زمان نیم (H) و هفت-هشتم سرد شدن (S) مشخص می‌شود. با قراردادن $\theta = 0.5$ و $\theta = 0.125$ در معادله ۲، زمان نیم و هفت-هشتم سرد شدن به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$H = [\ln(2j)/C]$$

$$S = [\ln(8j)/C]$$

زمان نیمه سرد شدن در کاربردهای عملی [۲۱] و زمان هفت-هشتم سرد شدن در کاربردهای تجارتي کاربرد دارند. زمان هفت-هشتم سرد شدن نزدیک به دمای مورد نیاز انبار یا حمل و نقل بوده و سه برابر زمان نیمه سرد شدن است [۲۵]. این دو پارامتر، مستقل از دمای اولیه محصول بوده و در طول زمان خنک‌کردن محصول ثابت خواهند ماند.

۲-۶- غیریکنواختی سرد شدن

یکی از پارامترهایی که می‌تواند توزیع یکنواخت دما را در قسمت‌های مختلف محصول توضیح دهد، پارامتر غیریکنواختی سرد شدن است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

Table 1 Cooling parameters in different layers of pomegranate (a, b, c) $V=0.5$ m/s (a)

Placement of sensors	J	$C(s^{-1})$	H(s)	S(s)	R^2	*E(%)
Center	1.1611	0.0002454	3433.23	9082.35	0.9951	2.87
Peel	0.8735	0.0003178	1755.51	6117.67	0.9960	3.20
V=1 m/s (b)						
Placement of sensors	J	$C(s^{-1})$	H(s)	S(s)	R^2	*E(%)
Center	1.1315	0.0002845	2870.62	7743.36	0.9971	2.15
Peel	0.8923	0.0003819	1516.61	5146.61	0.9990	5.51
V=1.3 m/s (c)						
Placement of sensors	J	$C(s^{-1})$	H(s)	S(s)	R^2	*E(%)
Center	1.2114	0.0003196	2768.85	7106.44	0.9960	3.69
Peel	0.7735	0.0003707	1177.01	4916.68	0.9904	5.57

*Maximum difference between the experimental and regression data

رینولدز باعث کاهش زمان سرد شدن می‌شود [۹]. یکی از پارامترهایی که که روی عدد رینولدز تأثیرگذار است، سرعت جریان هوای ورودی می‌باشد. با افزایش سرعت جریان هوا، عدد رینولدز افزایش می‌یابد (جدول ۲). از طرف دیگر، ضریب انتقال حرارت همرفتی متناسب با جذر عدد رینولدز ($h \propto \sqrt{Re}$) است [۲۷]. بنابراین، با افزایش عدد رینولدز، ضریب انتقال حرارت افزایش یافته و با افزایش این ضریب، انتقال حرارت در مرکز و پوست انار و آهنگ سرد شدن افزایش می‌یابد. بنابراین، سرعت جریان هوای ورودی یک عامل مؤثر در کاهش زمان‌های سرد شدن در قسمت‌های مختلف محصول است.

نکته دیگری که باید به آن توجه داشت، فاصله نقطه سرد شدن از جریان هوای سرد است. با توجه به این که مرکز انار نسبت به پوست میوه از نظر مکانی فاصله زیادتری با جریان هوای سرد دارد، بنابراین، زمان‌های سرد شدن در تمام سرعت‌های جریان هوا در مرکز نسبت به پوست انار بیشتر است. اموند و همکاران (۱۹۹۶) در آزمایش‌هایی که روی توت فرنگی در جعبه انجام دادند، گزارش نمودند که توت‌فرنگی‌هایی که در جلوی جعبه در معرض هوای خنک قرار داشتند، نسبت به توت‌فرنگی‌هایی که در وسط و آخر جعبه بودند، زودتر خنک شدند [۹]. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، آهنگ سرد شدن در انار (مرکز و پوست) در ابتدا زیاد و با گذشت زمان کاهش می‌یابد.

Table 2 Conventional heat transfer coefficient and Reynolds number at different airflow velocities

Airflow velocity (m/s)	Reynolds number	Conventional heat transfer coefficient ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
0.5	2877.73	11.02
1	5931.35	15.46
1.3	7582.57	17.80

پارامترهای فرایند سرمایش تحت تأثیر جریان هوا قرار داشته و در محصولات مختلف با هم فرق دارند. در پژوهش حاضر، با افزایش سرعت جریان هوا از ۰/۵ به ۱/۳ متر بر ثانیه، ضریب سرد شدن در مرکز و پوست محصول به ترتیب تا ۳۰/۲۴ و ۱۶/۶ درصد افزایش یافت. فاکتور تأخیر یک روند معین را با افزایش سرعت جریان هوا دنبال نکرد. نتایج پژوهش کومار (۲۰۰۸) در مورد پرتقال نشان داد که با افزایش سرعت جریان هوا، فاکتور تأخیر ابتدا کاهش و سپس افزایش یافت؛ اما در گوجه فرنگی فقط روند افزایشی مشاهده گردید [۲۰]. در آزمایش‌هایی که دینسر (۱۹۹۵) انجام داد، با افزایش سرعت جریان هوا، ضریب تأخیر در گوجه‌فرنگی کاهش و در گلابی افزایش یافت؛ در حالی که ضریب سرد شدن در گوجه‌فرنگی افزایش و در گلابی کاهش یافت [۲۱]. این در حالی بود که با افزایش سرعت جریان هوا از ۱ به ۲ متر بر ثانیه، هم ضریب تأخیر و هم ضریب سرد شدن در انگور افزایش یافتند. بنابراین، با توجه به خصوصیات حرارتی محصول در فرایند خنک‌کاری، باید به اثر هر دو متغیر به صورت ترکیبی توجه داشت. نکته دیگری که باید به آن توجه نمود این است که هر دو متغیر ذکر شده تحت تأثیر شکل محصول قرار می‌گیرند. با توجه به این که انارهای مورد آزمایش به طور دقیق یک شکل نبودند، تغییرات در قسمت‌های مختلف محصول و در سرعت‌های مختلف جود دارد. با افزایش سرعت جریان هوا از ۰/۵ به ۱/۳ متر بر ثانیه، زمان نیم و هفت-هشتم سرد شدن به ترتیب تا ۱۹/۳۵ و ۲۱/۷۶ درصد در مرکز و ۳۲/۹۵ و ۱۹/۶۳

درصد در پوست کاهش یافت که به دلیل افزایش در ضریب انتقال حرارت همرفتی بود. اموند و همکاران (۱۹۹۶) گزارش نمودند که افزایش در آهنگ جریان هوا یا افزایش در عدد

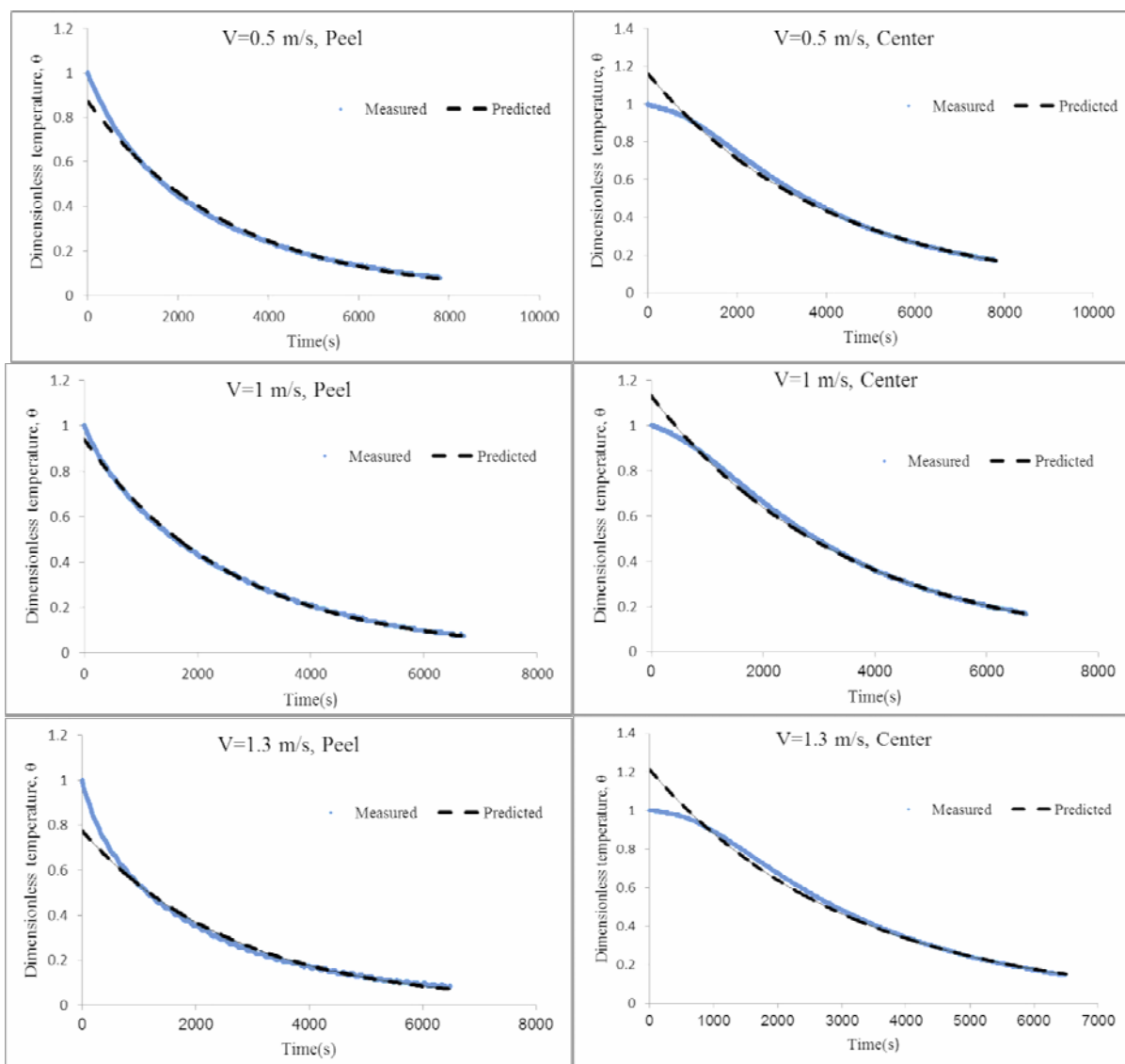


Fig 2 Cooling curves (experimental and regression) in the center and peel of pomegranate

میوه است. این دما (دمای بی‌بعد) برای پوست میوه $0/08$ بوده و معادل 6368 ثانیه از ابتدای سرد شدن انار می‌باشد. در تمام منحنی‌های مرکز و پوست میوه، هر چه به پایان فرایند خنک‌کاری نزدیک می‌شویم، شیب منحنی‌ها کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، در زمان‌های پایان خنک‌کاری، به علت کمتر شدن اختلاف بین دمای مرکز محصول و دمای جریان هوای ورودی، کاهش دما در مرکز و پوست میوه کندتر می‌شود. بنابراین، به منظور کاهش مصرف انرژی و رسیدن به دمای مورد نظر در محصول، می‌توان سرعت جریان هوا را تا $0/5$ متر بر ثانیه کاهش داد.

ابتدای سرد شدن در مرکز انار با یک تأخیر زمانی ($700-500$ ثانیه) شروع شده که باعث می‌گردد ابتدای منحنی سرد شدن نسبت به قسمت‌های پایین مسطح باشد. دلیل این موضوع، فاصله مرکز انار از هوای سرد در زمان خنک شدن محصول می‌باشد. یافته‌های لیندسی و همکاران (۱۹۸۳) نیز نشان داد که مرکز سیب‌زمینی‌هایی که در لایه‌های بالاتری نسبت به هوای سرد قرار داشتند، با یک تأخیر زمانی سرد شدند [۲۸].

در انار رقم شهوار، در مرکز آن و در محدوده دمای بی‌بعد $0/15$ برای سرعت حداکثر ($1/3$ متر بر ثانیه)، تأثیر کمی بر سرد شدن انار مشاهده می‌شود که معادل 6393 ثانیه از ابتدای سرد شدن

بر ثانیه، یک وارونگی^۵ در یکنواخت سرد شدن محصول می باشد؛ زیرا انتظار می رفت که با افزایش سرعت، غیریکنواختی به طور پیوسته کاهش یابد. افزایش در ضریب سرد شدن باعث می شود که جسم جامد در برابر تغییرات دما سریع تر واکنش نشان دهد [۳۰]. بنابراین، در پوست انار، با افزایش ضریب سرد شدن از ۰/۰۰۳۱۷۸ به ۰/۰۰۳۸۱۹ (بر ثانیه) غیریکنواختی سرد شدن به میزان ۱۰/۲۳ درصد کاهش یافت. همچنین، با افزایش سرعت جریان هوا از ۱ به ۱/۳ متر بر ثانیه، ضریب سرد شدن از ۰/۰۰۳۸۱۹ به ۰/۰۰۳۷۰۷ (کاهش و بنابراین، غیریکنواختی سرد شدن تا ۴/۷۰ درصد افزایش یافت.

Table 3 Weight loss at different airflow velocities

Airflow velocity (m/s)	Initial weight (g)	Final weight (g)	Percent of weight loss
0.5	385.43	384.70	0.19
1	378.31	377.22	0.29
1.3	355.53	354.78	0.21

با این حال، فاکتور تأخیر در پوست کمتر از یک و مقاومت به انتقال حرارت قابل صرف نظر کردن بود. از طرف دیگر، در سرعت جریان هوای ۰/۵ تا ۱ متر بر ثانیه، فاکتور تأخیر تا ۲/۵۵ درصد در مرکز کاهش پیدا کرد و بنابراین، انتقال حرارت نیز کاهش یافت. با افزایش سرعت جریان هوا از ۱ به ۱/۳ متر بر ثانیه، فاکتور تأخیر در مرکز افزایش پیدا کرد و باعث افزایش ۷/۳۶ درصدی در غیریکنواختی سرد شدن شد. در نتیجه، غیریکنواختی سرد شدن بستگی به مقدار سرعت جریان هوای سرد، ضریب سرد شدن و فاکتور تأخیر دارد. بنابراین، همه این متغیرها با یکدیگر (نه به صورت منفرد)، می توانند غیریکنواختی سرد شدن را توضیح دهند.

۳-۲- افت وزن میوه

نکته ای که باید در انجام پیش خنک کاری با هوای سرد اجباری برای محصولات توجه داشت، کاهش وزن میوه است. بنابراین، افت وزن میوه در سرعت های مختلف جریان هوای سرد مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به جدول ۳، درصد کاهش وزن در اثر استفاده از جریان هوای سرد در سرعت های مختلف ناچیز بود. بنابراین، از این متغیر در تجزیه و تحلیل فرایند سرد شدن صرف نظر گردید.

۳-۳- یکنواختی سرد شدن

یکنواختی توزیع دما در محصول نیز یکی از پارامترهایی است که در فرایند سرد شدن محصول باید مورد توجه قرار گیرد. سرعت جریان هوای سرد، یکی از متغیرهایی است که می تواند این پارامتر را تحت تأثیر قرار دهد. برای این منظور، پارامتر غیریکنواختی سرد شدن با استفاده از معادله ۶ در مرکز و پوست انار محاسبه گردید. هر چه این پارامتر از نظر مقدار کوچک و در قسمت های مختلف محصول به هم نزدیک تر باشد، نشان دهنده توزیع یکنواخت تر دما در قسمت های مختلف محصول است [۲۶].

همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود، با افزایش سرعت هوا از ۰/۵ به ۱ متر بر ثانیه، غیریکنواختی کاهش و سپس، با افزایش سرعت تا ۱/۳ متر بر ثانیه آن افزایش می یابد. کاسترو و همکاران (۲۰۰۵)، آزمایش هایی روی گوی های پلاستیکی در سرعت های ۰/۳۰-۱/۰۴۳ متر بر ثانیه انجام دادند [۲۹]. آن ها گزارش نمودند که نیروی جاذبه در سرعت کمتر روی کاهش غیریکنواختی اثر داشته و باعث توزیع دمای یکنواخت تری در محصول گردید. دلیل دیگر کاهش غیریکنواختی مربوط به اثر همرفت طبیعی است که توسط کاسترو و همکاران (۲۰۰۵b) گزارش گردید [۱۱]. این گزارش ها با تحقیق انجام شده در سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه مطابقت دارد. افزایش غیریکنواختی از سرعت ۱ به ۱/۳ متر

سرد شدن قسمتی از زمان نیمه سرد شدن می‌باشد [۳۱]. در سیستم‌هایی که آهنگ خنک‌کاری سریع است، تغییرات دمایی درون محصول کندتر از تغییرات دمایی سطح آن است. در چنین مواردی، عامل محدودکننده، هدایت دما از درون به سطح است. بنابراین، هر چه نسبت S/H (نسبت زمان هفت-هشتم به زمان نیمه سرد شدن) در مرکز کمتر باشد، محصول سریع‌تر خنک شده و افزایش کارایی را به دنبال دارد. با توجه به جدول ۴، در سرعت ۱/۳ متر بر ثانیه، نسبت S/H کمترین مقدار خود را در مرکز انار داشته و در این سرعت، مرکز محصول سریع‌تر به دمای مطلوب خنک‌کنندگی می‌رسد. بنابراین، با افزایش سرعت جریان هوای سرد می‌توان کارایی سرد شدن محصول را تا حد زیادی افزایش داد.

۴- نتیجه‌گیری

با افزایش سرعت جریان هوا تا ۱/۳ متر بر ثانیه، زمان نیمه و هفت-هشتم سرد شدن به ترتیب ۱۹/۳۵ و ۲۱/۷۶ درصد در مرکز و ۳۲/۹۵ و ۱۹/۶۳ درصد در پوست کاهش یافت. به منظور افزایش کارایی سرد شدن، سرعت جریان هوایی باید انتخاب شود که ترکیبی از کاهش زمان و افزایش یکنواختی سرد شدن در تمام لایه‌های انار را حاصل نماید. این دو هدف با سرعت جریان هوای سرد ۱/۳ متر بر ثانیه به دست آمد. علاوه بر این، در سرعت جریان هوای پایین، نیروی جاذبه و همرفت طبیعی و در سرعت جریان هوای بالا، ضریب سرد شدن و فاکتور تأخیر نقش مهمی در غیریکنواختی سرد شدن داشتند. در مجموع، سرعت جریان هوای ۱/۳ متر بر ثانیه برای انجام عملیات پیش‌خنک‌کاری انار رقم شهوار توصیه می‌شود. همچنین، نتایج کلی نشان داد که روش به کاربرده شده برای تجزیه و تحلیل فرایند سرد شدن انار می‌تواند روند توزیع دما را به خوبی توضیح داده و برای دیگر میوه‌های کروی شکل نیز به کار رود.

۵- منابع

[1] Mphahlele, R., Fawole, O., Mokwena, L., & Opara, U.L. 2016. Effect of extraction method on chemical, volatile composition and

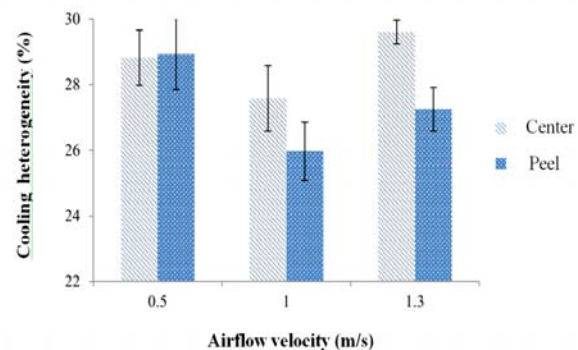


Fig 3 Cooling heterogeneity at three levels of airflow velocity in the center and peel of pomegranate

Table 4 The ratio of S/H in different parts of pomegranate

Airflow velocity (m/s)	Center	Peel
0.5	2.65	3.48
1	2.70	3.39
1.3	2.57	4.18

۳-۴- کارایی سرد شدن

کارایی سرد شدن در محصول با کاهش زمان فرایند به دست می‌آید [۲۹]. کاهش زمان سرد شدن (زمان نیمه و هفت-هشتم سرد شدن) یکی از دلایل توزیع یکنواخت‌تر دما در محصول نیز می‌باشد [۹]. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت جریان هوا از ۰/۵ به ۱/۳ متر بر ثانیه، زمان نیمه سرد شدن و زمان هفت-هشتم سرد شدن کاهش یافت. بعد از حدود ۶۴۰۰ ثانیه از ابتدای سرد شدن محصول، تأثیر سرعت جریان هوا روی خنک‌کاری در مرکز و پوست میوه کاهش پیدا کرد. بنابراین، تمام قسمت‌های انار از جمله مرکز و پوست به یک دمای نزدیک به هم رسیدند. در این حالت می‌توان سرعت جریان هوای سرد را تا رسیدن به دمای مطلوب خنک‌سازی کاهش و در مصرف انرژی صرفه‌جویی نمود. نتایج پژوهش دهقان‌نیا و همکاران (۲۰۱۱) نیز نشان داد که دمای ستون لایه‌های مختلف گوی‌های پلاستیکی که در معرض هوای سرد اجباری بودند، بعد از یک دوره زمانی معین تقریباً یکسان شدند [۲۶]. زمان هفت-هشتم

- [11] Castro, L.R., Vigneault, C., & Cortez, L.A.B. 2004b. Effect of container opening area on air distribution during precooling of horticultural produce. *Transactions of the ASAE*, 47(6): 2033-2038.
- [12] Dincer, I. 1993. Heat transfer coefficients in hydrocooling of spherical and cylindrical food products. *Energy*, 18(4): 335-340.
- [13] Smale, N.J. Moureh, J., & Cortella, J. 2006. A review of numerical models of airflow in refrigerated food applications. *International Journal of Refrigeration*, 29: 911-930.
- [14] Zou, Q., Linus, O.U., & Mckibbin, R.A. 2006a. CFD modeling system for airflow and heat transfer in ventilated packaging for fresh foods: I. Initial analysis and development of mathematical models. *Journal of Food Engineering*, 77(4): 1037-1047.
- [15] Zou, Q., Linus, O.U., & Mckibbin, R.A. 2006b. CFD modeling system for airflow and heat transfer in ventilated packaging for fresh foods: II. Computational solution, software development and model testing. *Journal of Food Engineering*, 77(4): 1048-1058.
- [16] Fikiin, A.G. 1983. Investigating the factors of intensifying fruits and vegetable cooling. *International Journal of Refrigeration*, 6: 176-181.
- [17] Hass, E., Felsenstein, G., Shitzer, A., & Manor, G. 1976. Factors affecting resistance to airflow through packed fresh fruit. *ASHRAE Transactions*, 82(2): 548-554.
- [18] Dennis, C. 1984. Effect of storage and distribution conditions on the quality of vegetables. *Acta Horticulturae*, 163: 85-104.
- [19] Lambrinos, G., Assimaki, H., Manolopoulou, H., Sfakiotakis, E., & Porlimgis, J. 1997. Air precooling and hydrocooling of Hayward kiwifruit. *Acta Horticulturae*, 444(2): 561-566.
- [20] Kumar, R., Kumar, A., & Murthy, U.N. 2008. Heat transfer during forced air precooling of perishable food products. *Biosystems Engineering*, 99(2): 228-233.
- [21] Dincer, I. 1995. Airflow precooling of individual grapes. *Journal of Food Engineering*, 26(2): 243-249.
- [22] Dincer, I. 1996. An exact solution on the estimation of heat transfer rates during deep-freezing of slab products. *Journal of Food Engineering*, 30(3-4): 417-423.
- antioxidant properties of pomegranate juice. *South African Journal of Botany*, 103: 135-144.
- [2] Fadavi, A., Barzegar, M., & Azizi, M.H. 2006. Determination of fatty acids and total lipid content in oilseed of 25 pomegranates varieties grown in Iran. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19(6-7): 676-680.
- [3] Vigneault, C., Goyette, B., Garipey, Y., Cortbaoui, P., Charles, M.T., & Raghavan, V.G.S. 2007. Effect of ear orientations on hydrocooling performance and quality of sweet corn. *Postharvest Biology and Technology*, 43(3): 351-357.
- [4] Sargent, S.A., Talbot, M.T., & Brecht, J.K. 1988. Evaluating precooling methods for vegetable packinghouse operations. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, p 175-182, Florida cooperative extension service.
- [5] Talbot, M.T., & Chau, K.V. 1991. Precooling strawberries. *Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. Circular 942.*
- [6] Kader, A.A. 2002. Postharvest technology of horticultural crops. *Cooperative Extension of University of California, Division of Agricultural and Natural Resources, University of California, Davis, CA, Publication No. 3311.*
- [7] Brosnan, T., & Sun, D-W. 2001. Precooling techniques and applications for horticultural products – a review. *International Journal of Refrigeration*, 24(2): 154-170.
- [8] Thompson, J.F., Mitchel, F.G., Rumsey, T.R., Kasmire, R.F., & Crisosto, C.H. 1998. *Commercial cooling of fruits, vegetables, and flowers. University of California, Agriculture and Natural Resources, Davis, DANR Publication 21567.*
- [9] Emond, J.P., Mercier, F., Sadfa, S.O., Bourre, M., & Gakwaya, A. 1996. Study of parameters affecting cooling rate and temperature distribution in forced air precooling of strawberry. *Transactions of the ASAE*, 39 (6): 2185-2191.
- [10] Castro, L.R., Vigneault, C., & Cortez, L.A.B. 2004a. Container opening design for horticultural produce cooling efficiency. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 2(1): 135-140.

- [28] Lindsay, R.T., Neale, M.A., & Messer, H.J.M. 1983. Ventilation rates for positive ventilation of vegetables in bulk bins. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 28(1): 33-44.
- [29] Castro, L.R., Vigneault, C., & Cortez, L.A.B. 2005. Cooling performance of horticultural produce in containers with peripheral openings. *Postharvest Biology and Technology*, 38(3): 254-261.
- [30] Ozisik, M.N. 1985. *Heat transfer: a Basic Approach*. McGraw Hill, New York.
- [31] Henry, F.E., & Bennett, A.H. 1973. Hydraircooling vegetables products in unit loads. *Transactions of the ASAE*, 16(4): 731-739.
- [23] Arifin, B.B., & Chau, K.V. 1988. Cooling of strawberries in cartons with new vent hole designs. *ASHRAE Transactions*, 94(1): 1415-1426.
- [24] Ngcobo, M.E.K., Delele, M.A., Opera, U.L., & Meyer, C.J. 2013. Performance of multi-packaging for table grapes based on airflow, cooling rates and fruit quality. *Journal of Food Engineering*, 116(2): 613-621.
- [25] Guillou, R. 1960. Forced air fruit cooling. *Transactions of the ASAE* 3(2): 16-18.
- [26] Dehghannya, J., Ngadi, M., & Vigneault, C. 2011. Mathematical modeling of airflow and heat transfer during forced convection cooling of produce considering various package vent areas. *Food Control*, 22(8): 1393-1399.
- [27] Holman, J.P. 1986. *Heat Transfer*. McGraw-Hill, New York.

Effect of airflow velocity on cooling kinetic of different layers of pomegranate by forced air precooling

Behaen, M. A. ^{1*}, Mahmoudi, A. ², Ranjbar, S. F. ³, Naghavi, E. A. ⁴

1. Ph.D. Student, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

2. Associate professor, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

3. Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz

4. Ph.D. Student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

(Received: 2015/09/11 Accepted: 2016/01/06)

The objective of the present study was to determine the influence of airflow velocities on precooling process of pomegranate with thin peel (Shahvar variety), to evaluate the cooling rate and temperature distribution in this product in order to design and optimize the precooling system. Forced air cooling was applied for precooling the center (arils) and peel (outer layer) of pomegranate. Airflow velocities were 0.5, 1, and 1.3 m/s and the air temperature was 7.2°C in the air tunnel during the experiments. For calculating cooling rates (half and seven-eighths cooling time), lag factor and cooling coefficient were determined from the experimental data by a regression analysis. Also, cooling heterogeneity was evaluated in the center and outer layer of pomegranate at different airflow velocities. The results showed that with increasing the airflow velocity from 0.5 to 1.3 m/s, cooling rates increased. Furthermore, with enhancing the airflow velocity, half and seven-eighths cooling time decreased up to 19.35 and 21.76% in the center and by 32.95 and 19.63 in the peel, respectively. This finding was due to increasing convective heat transfer coefficient. Cooling heterogeneity decreased from 0.5 to 1 m/s and then increased at the airflow velocity of 1.3 m/s. This parameter was dependent on airflow velocity, cooling coefficient and lag factor. The influence of airflow velocity was low after 6400s from starting the cooling process both in center and in peel. The overall results demonstrated that application of this method can explain unsteady heat transfer in precooling process of pomegranate and probably can be used for the other similarly shaped fruits.

Keywords: Pomegranate, Forced air cooling, Cooling rate, Precooling, Temperature distribution

* Corresponding Author: Email Address: ali_behaen@yahoo.com